Ensayo de Jominy

Santiago Rico

Felipe Caltieri

Diego Acuña

Rodrigo Silva

Universidad de la República

Facultad de ingeniería

Metalurgia Física

2024







Objetivos

Realizar el ensayo de Jominy a probetas de aceros SAE1045 y SAE4140, estudiando su templabilidad y la relación entre la velocidad de enfriamiento y dureza en distintos lugares de la probeta.

Introducción

El ensayo de Jominy es un test estandarizado bajo la norma ISO 642:1999 [1]. Éste consiste esencialmente en calentar una probeta cilíndrica a una temperatura específica en el rango austenítico para luego templarla mediante el rocío contínuo de uno de sus extremos con agua bajo condiciones específicas, con el fin de medir la dureza en función de la penetración del extremo enfriado y estudiar así la templabilidad del material.

Para explicar el comportamiento de las probetas se debe conocer la composición de ambos aceros, que se puede observar en la Tabla 1.

	Carbono (C)	Manganeso (Mn)	Silicio (Si)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)
SAE 4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,20-0,35	0,040 máx	0,035 máx	0,80-1,10	0,15-0,25
SAE 1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,10-0,30	0,050 máx	-	-	-

Tabla 1: Porcentajes en peso de los distintos elementos aleantes del acero

Metodología

Primero se prepararon las probetas: se tomaron las medidas de ambas probetas a utilizar para corroborar que sus medidas coincidieran con las establecidas por la norma y se anotó cual marca en la probeta corresponde a qué material, para distinguirlas a lo largo del experimento. Finalizadas las mediciones, se insertó la probeta del acero SAE4140 al horno, a una temperatura de 920°C, se corroboró con el pirómetro, el cual marcó una temperatura de 929°C y se comenzó la medición del tiempo. Posteriormente se colocó la probeta de acero SAE1045 en el horno rápidamente para evitar la pérdida de calor con el ambiente debido a la apertura del horno.

Luego se verificó que la altura del chorro de agua del dispositivo de enfriamiento cumpla con la norma, llegando a una altura de 12,5 mm y a una temperatura de 7°C. Pasados los primeros 40 minutos se procedió a remover la probeta de SAE4140 del horno y se la introdujo muy rápidamente en el dispositivo de enfriamiento, donde se mantuvo por 10 minutos y se apartó a un costado. Pasados 52 minutos desde el inicio del experimento, se retiró la probeta SAE1045 del horno y se repitió el procedimiento anterior. Cabe destacar que la segunda probeta se retiró del horno a una temperatura de 1100°C medidos con el pirómetro.

Una vez templadas las probetas, éstas fueron maquinadas por los docentes para luego realizar el ensayo de dureza. Primero se realizaron marcas sobre la superficie maquinada para usar como referencia a la hora de realizar el ensayo de dureza, en principio a una distancia de 1,5; 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 mm desde el extremo enfriado de la probeta, como indica la norma.

Mientras se marcan los lugares donde serían indentadas las probetas, se procede a medir la dureza de un patrón para comparar con el resultado esperado para verificar que los durómetros estén calibrados. De los resultados obtenidos se concluyó que el durómetro con escala Rockwell no estaba calibrado y por lo tanto se decidió realizar este experimento utilizando en su lugar un durómetro con escala Vickers, para luego convertir las durezas obtenidas a Rockwell C, como establece la norma, utilizando la Tabla 5 del anexo.

Luego de medidas las durezas en los puntos establecidos por la norma, se procedió a medir la dureza en otros puntos más alejados para analizar en mejor manera la variación de dureza de ambos materiales. En la probeta de acero SAE4140 se midió la dureza a 26,02 y 62,5 mm, mientras que en la probeta de acero SAE1045 se midió la dureza cada 5 mm desde la marca de los 15 mm hasta los 25 mm inclusive.

Análisis de datos

Una vez medidas las durezas en ambas probetas se procedió a realizar el análisis de datos. Las medidas de la dureza en función de la longitud desde el extremo enfriado de la probeta SAE4140 y SAE1045 se muestran en la Tabla 3 y 4 del anexo, respectivamente.

En ambas tablas es posible visualizar los valores en función de la distancia del extremo enfriado (d), las medidas de ambas diagonales de la indentación producida por el durómetro (*s1 y s2*), el promedio de los valores de las diagonales (*s*) y el valor de dureza en la escala medida utilizada (Vickers) y la dictada por la norma (Rockwell C).

Antes de comenzar el análisis de datos es debido aclarar que se espera una leve discrepancia en la dureza Vickers (y por lo tanto en la Rockwell C también), debido a que a la hora de verificar la calibración del durómetro, éste midió valores levemente diferentes pero aún válidos para la realización del experimento. Además, no se calcula la incertidumbre de la dureza Vickers debido a que no se tiene la incertidumbre en el valor de la fuerza ejercida ni en el ángulo de la pirámide de indentación.

d(mm)	1,5	3	5	7	9	11	13	15
HRC (4140)	58,46	56,37	57,38	55,33	51,21	51,21	48,2	46,12
HRC (1045)	59,2	58,88	57,61	51,11	40,61	38,83	33,87	33,43
HRC (Diferencia)	-0,74	-2,51	-0,23	4,22	10,6	12,38	14,33	12,69

Tabla 2: Comparativa de durezas en las distancias establecidas según la norma para la probeta de SAE4140 y SAE1045 junto a sus diferencias.

Se puede observar que la dureza disminuye en ambos materiales a medida que aumenta la distancia al borde enfriado, siendo el acero SAE 1045 en cual decrece más rápido en comparación al SAE4140. También se puede observar una leve diferencia de durezas entre SAE4140 y SAE1045 en el rango de 1,5 mm a 5 mm, mostrando una diferencia negativa (indicando que el SAE1045 es más duro que el SAE4140). Esto es debido a la diferencia en composición de ambos aceros. El acero SAE1045, al tener mayor cantidad de C, adquiere una mayor dureza a nivel superficial mientras que el acero SAE4140, al tener Cr y Mo, mantiene la dureza a mayor profundidad.

Para apreciar mejor esta diferencia se graficó los resultados de la dureza en la Figura 1 y 2 para los aceros SAE4140 y SAE1045 respectivamente. Además, se añadieron dos curvas correspondientes a los valores máximos y mínimos de dureza que puede presentar el acero extraídos de [2] y [3]. Es posible observar que los valores experimentales están comprendidos en su totalidad por ambas curvas teóricas en ambos aceros, por lo que los resultados son concordantes.

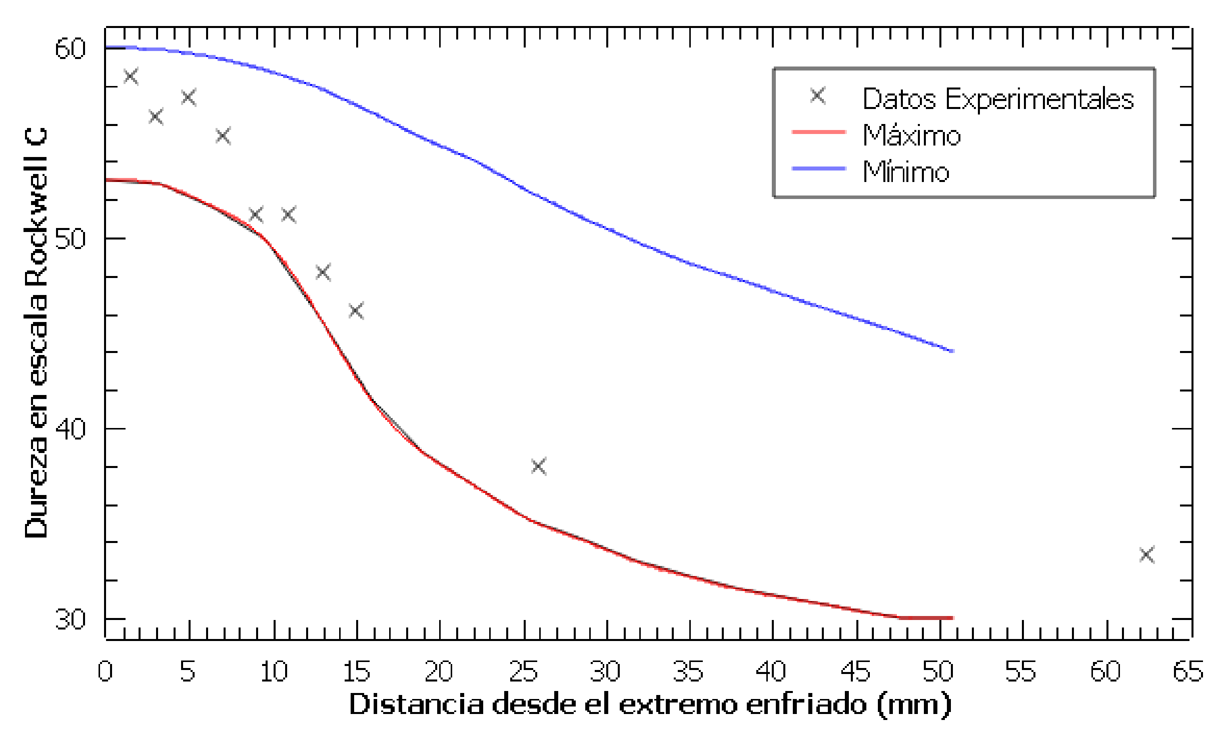


Figura 1: Gráfico de la dureza Rockwell C en función de la distancia al extremo enfriado de la probeta SAE4140.

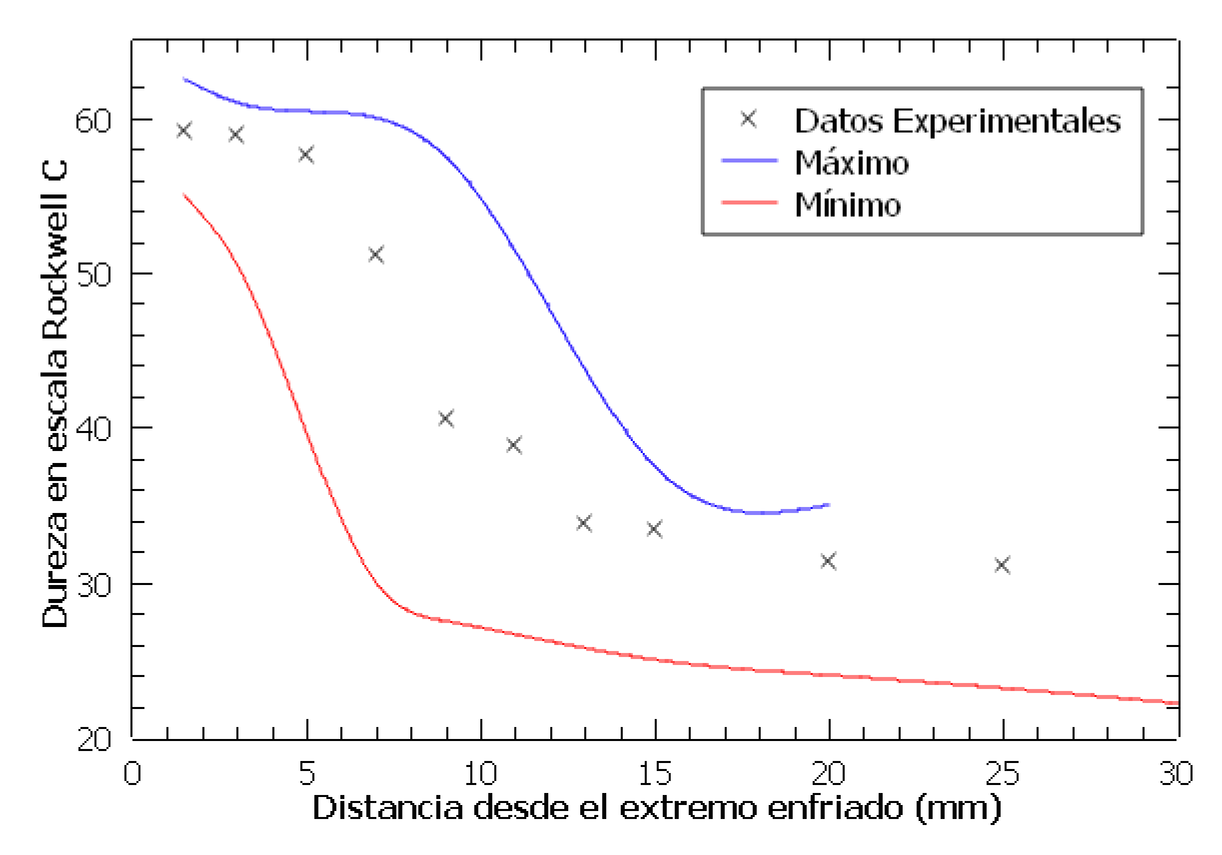


Figura 2: Gráfico de la dureza Rockwell C en función de la distancia al extremo enfriado de la probeta SAE1045.

Este comportamiento se debe a que el temple es un proceso superficial que decae rápidamente al analizar la parte interna del material, debido a que se caracteriza por la alta concentración de fase martensita en el acero (que solo es posible con altas velocidades de enfriamiento), y al aumentar la profundidad a la que se analiza el acero es posible observar que la velocidad de enfriamiento disminuye pues aumenta la superficie a enfriar. Es debido a ello que se genera un gradiente en las velocidades de enfriamiento de la probeta y por ende un gradiente en las fases en la que se presenta el acero (teniendo un alto nivel de martensita en la superficie y nula en el núcleo).

Los principales aleantes del acero SAE4140 son los que explican esta diferencia drástica en la dureza final, especialmente cuanto más grande es la distancia del borde de enfriamiento. Éstos son en mayor medida el Cr y Mo, y en menor medida en Mn, Si, P, los cuales afectan la dureza deformando y desplazando la curva de formación bainítica/perlítica, alejándola del punto t=0 en un diagrama CCT (Continuous Cooling Transformation), permitiendo un mayor tiempo en el cual desde que se empieza el enfriamiento en el cual se puede formar martensita.

Conclusiones

Con los datos obtenidos anteriormente es posible concluir que la velocidad de enfriamiento está relacionada con la dureza del acero debido a que ambas magnitudes cambian de igual manera al variar la profundidad de análisis de la probeta.

Además, gracias a los valores calculados en las Tablas 3 y 4, y como se puede observar en la Figura 1 y 2, el acero SAE4140 tiene mejor templabilidad que el acero SAE1045 debido a que mantiene la dureza a mayor profundidad.

Anexo

d (mm)	s1 (mm)	s2 (mm)	s (mm)	HV	HRC
1,5	0,3	0,3	0,3	662,555556	58,46
3	0,31	0,31	0,31	620,49948	56,37
5	0,31	0,3	0,305	641,010481	57,38
7	0,34	0,29	0,315	600,95742	55,33
9	0,34	0,33	0,335	531,343284	51,21
11	0,34	0,33	0,335	531,343284	51,21
13	0,35	0,35	0,35	486,77551	48,2
15	0,36	0,36	0,36	460,108025	46,12
26,02	0,4	0,4	0,4	372,6875	38,01
62,5	0,42	0,43	0,425	330,131488	33,35

Tabla 3: Datos de dureza tomados en la probeta de acero SAE4140

d (mm)	s1 (mm)	s2 (mm)	s (mm)	HV	HRC
1,5	0,296	0,297	0,2965	678,289999	59,20
3	0,297	0,299	0,298	671,478762	58,88
5	0,306	0,302	0,304	645,234591	57,61
7	0,333	0,338	0,3355	529,760728	51,11
9	0,384	0,39	0,387	398,146479	40,61
11	0,394	0,398	0,396	380,254566	38,83
13	0,419	0,425	0,422	334,841985	33,87
15	0,423	0,426	0,4245	330,909641	33,43
20	0,436	0,437	0,4365	312,96539	31,37
25	0,443	0,433	0,438	310,825462	31,10

Tabla 4: Datos de dureza tomados en la probeta de acero SA E1045.

EQUIVALENCIAS ENTRE DUREZAS BRINELL, ROCKWELL, VICKERS Y SHORE Y LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRc	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm²
2.35	682	64.0					
2.40	652	83.0	-	65	885	91.0	232.9
2.45	627	81.5	-	63	820	87.2	221.5
2.5	600	80.5	-	61	765	84.8	213.5
2.55	578	79.5	-	59	633	76.5	188.7
2.60	555	79.0	-	59	717	81.5	204.0
2.65	534	78.0	120	57	675	78.5	195.1
2.70	514	77.0	119	54	598	73.5	181.3
2.75	495	76.5	119	52	567	71.0	174.9
2.80	477	75.5	117	51	540	68.5	168.0
2.85	461	74.4	117	49	515	66.7	162.2
2.90	444	73.5	116	48	494	65.0	157.0
2.95	429	73.0	115	46	472	63.0	150.6
3.00	415	72.5	115	45	454	61.0	145.6
3.05	401	71.5	114	44	437	59.0	140.0
3.10	388	71.0	113	42	420	57.2	136.0
3.15	375	70.5	112	41	404	65.8	132.0
3.20	363	70.0	112	40	389	54.0	127.5
3.25	352	69.5	110	39	375	52.2	123.4
3.30	341	68.5	110	38	363	50.5	120.0
3.35	331	68.0	109	36	350	49.2	115.9
3.40	321	67.5	109	35	339	48.0	112.4
3.45	311	67.0	108	34	327	46.7	109.1
3.50	302	66.5	108	33	316	45.2	105.6
3.55	293	66.0	107	32	305	44.5	102.7
3.60	285	65.5	106	31	296	43.2	99.6
3.65	277	65.0	105	30	287	42.0	96.9
3.70	269	64.5	104	29	279	41.0	94.2
3.75	262	64.0	104	28	270	40.0	91.5
3.80	255	63.0	103	27	263	39.2	89.1
3.85	248	62.5	102	25	256	38.5	86.7
3.90	241	62.0	102	24	248	37.5	84.3
3.95	235	61.5	100	23	241	36.5	81.9
4.00	229	61.0	100	22	235	35.7	79.9
4.05	223	60.5	99	21	229	35.0	77.9
4.10	217	-	98	20	223	34.0	75.8
4.15	212	-	97	18	217	33.0	73.8
4.20	207	-	96	17	212	32.5	72.1
4.25	202	-	96	16	207	32.0	70.4
4.30	197	-	95	15	202	31.2	68.7
4.35	192	-	94	14	197	30.2	67.0
4.40	187	-	93	13	192	29.5	65.3
4.45	183	-	92	11	187	29.0	63.6
4.50	179	-	91	10	183	28.5	62.2
4.55	174	-	90	9	179	28.0	60.9
4.60	170	-	89	7	174	27.5	59.2
4.65	166	-	88	6	170	26.5	57.8
4.70	163	-	87	4	166	25.5	56.3
4.75	159	-	86	3	163	25.0	55.4
4.80	156	-	85	1	159	24.5	54.0
4.85	153	-	84	0	156	24.0	53.0
4.90	149	-	82	-	153	23.0	52.0
4.95	146	-	81	--	149	23.0	50.7
5.00	143	-	80	--	146	22.0	49.6
5.05	140	-	79	-	143	22.0	48.6
5.10	137	-	78	-	140	21.0	47.6
5.15	134	-	77	-	137	21.0	46.6
5.20	131	-	76	-	134	21.0	45.6
5.25	128	-	74	-	131	20.0	44.5
5.30	126	-	73	-	128	20.0	43.5
5.35	124	-	72	-	126	-	42.8
5.40	121	-	71	-	124	-	42.2
5.45	118	-	70	-	121	-	41.2
4.50	116	-	69	-	118	-	40.1
5.55	114	-	68	-	116	-	39.4
5.60	112	-	67	-	114	-	38.8
5.65	109	-	66	-	112	-	38.0
5.70	107	-	65	-	109	-	37.1
5.75	105	-	64	-	107	-	36.4
5.80	103	-	62	-	105	-	35.7
			61	-	103	-	35.0

Tabla 5: Conversión de dureza Vickers a dureza Rockwell C.

Bibliografía

[1] International Organization for Standardization. (1999). Steel — Hardenability test by end quenching (Jominy test) (ISO Standard No. 642:1999). https://www.iso.org/standard/1228.html

[2] Ficha Técnica de acero 1045 (IRAM 1045) - Instituto Argentino de Siderurgia

[3] Ficha Técnica de acero 4140 (IRAM 4140) - Instituto Argentino de Siderurgia